Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

جغرافیا و مخاطرات محیطی، شمارهٔ سی و هفتم، بهار ۱٤۰۰

صص ۹۷- ۸۱

: https://dx.doi.org/10.22067/geoeh.2021.68445.1012

مقاله پژوهشی

مورفولوژی و فرآیندهای مؤثر در تغییرات مسیر جریان رودخانه سفیدرود برای پیش‌بینی افق ۲۰۳۰

حمیدرضا معصومی[۱] - گروه زمین‌شناسی، واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران.

علیرضا حبیبی - پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

علیرضا قدرتی - مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی گیلان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱ تاریخ بازنگری: ۱٤۰۰/۱/۱۱ تاریخ تصویب: ۱٤۰۰/۱/۲۸

چکیده

سفیدرود به‌عنوان بزرگ‌ترین و مهم‌ترین رودخانه سواحل جنوب دریای خزر نقش مهمی در زندگی، فعالیت‌ها و سرمایه‌های انسانی منطقه دارد. عوامل مورفولوژیک رودخانه و محیط‌های پیرامون آن و پیش‌بینی شرایط آینده می‌تواند در برنامه‌ریزی و آمایش دشت‌های ساحلی مؤثر و ضروری واقع شود. در این پژوهش از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵، ۷ و ۸ سال‌های، ۲۰۰۲،۱۹۸۷ و ۲۰۱۸، همراه با داده‌های تغییرات تراز دریای خزر و دبی سفیدرود، بررسی‌های میدانی و نرم‌افزارهای Envi 5.3، ArcGIS 10.4.1 و Idrisi TerrSet به‌عنوان ابزار تحقیق بهره گرفته شد. ابتدا مقادیر احتمال تبدیل کاربری اراضی در سال ۲۰۱۸ بر مبنای مدل تلفیقی زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار به دست آمد. نتایج نشان داد که مدل تلفیقی، دارای دقت و صحت بالایی جهت پیش‌بینی الگوی آینده است. سپس با توجه به دقت و صحت خروجی مدل، نقشه پیش‌بینی کاربری اراضی و مورفولوژی رودخانه برای سال ۲۰۳۰ تهیه شد. با برازش دو نقشه سال ۲۰۱۸ و پیش‌بینی ۲۰۳۰ تغییرات محتمل در محیط رودخانه به دست آمد و در چهار محدوده مورد تحلیل قرار گرفت. درنهایت با استفاده از داده‌های تغییرات تراز دریای خزر و دبی سالانه رودخانه سفیدرود، روند تغییرات و پیش‌بینی مدل، موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بیشترین احتمال تغییرات در منطقه مطالعه مربوط به واحدهای رودخانه، اراضی ساحلی، تأسیسات ساخت انسان و دشت است. همچنین تا سال ۲۰۳۰، روند افزایش عرض کانال رودخانه رخ خواهد داد.

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۳۵۵۰۱۸٦٦۹ Email: h.masoumi@iauba.ac.ir

این امر نشان دهنده افزایش میانگین دبی سالانه رودخانه تا حدود ۱۰۰ مترمکعب بر ثانیه و افزایش تراز دریای خزر به سطح بالاتر از ۲۷- متر تا سال ۲۰۳۰ است.

کلیدواژه‌ها: کانال رودخانه، زنجیره مارکف، مدل سلول‌های خودکار، مطالعات سنجش‌ازدور، سفیدرود.

۱- مقدمه

رودخانه‌ها به‌عنوان شریان حیاتی، از دیرباز تعیین کننده گستره و استقرار تمدن‌ها به‌ویژه در دشت‌های ساحلی بوده‌اند. سفیدرود بزرگ‌ترین و پرآب‌ترین رودخانه سواحل جنوبی دریای خزر، به دلیل وجود کاربران متعددی ازجمله کشاورزی، صنعت، گردشگری، پرورش آبزیان و... یکی از مهم‌ترین منابع آب در استان گیلان محسوب می‌شود. بارش‌های شدید و جاری شدن آب از بالادست، لایروبی نشدن رودخانه‌ها، تغییر در کانال رود و کم شدن فضای آبگذری نسبت به حجم آب ورودی به هنگام بارندگی، از عوامل وقوع سیلاب در رودخانه‌های مناطق ساحلی هستند. در این میان اهمیت مطالعات مورفولوژیکی رودخانه‌ها و بررسی عکس‌العمل رودخانه در برابر فرایندهای تغییر دهنده برقراری موازنه ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. ازاین‌رو باید رودخانه را به‌مثابه یک موجود زنده دانست و برای کاهش اثرات تغییر آن، عملکرد هوشیارانه‌ای مبتنی بر قواعد علمی در برنامه‌ریزی‌های محیطی بکار برد. لذا دانستن شرایط رودخانه و محیط‌های پیرامون آن و پیش‌بینی شرایط آینده می‌تواند در برنامه‌ریزی و آمایش دشت‌های ساحلی مؤثر و ضروری واقع شود. در این میان استخراج اطلاعات به‌صورت طبقه‌بندی شده از پرکاربردترین روش‌های موجود است (میرزایی‌زاده و همکاران[۱]، ۲۰۱۵). بدین ترتیب با استفاده از تغییرات روی داده در گذر زمان می‌توان آینده را پیش‌بینی کرد. داده‌های ماهواره‌ای یکی از سریع‌ترین و کم هزینه‌ترین روش‌های در اختیار محققان، برای تهیه نقشه است (پال و مدر[۲]، ۲۰۰۵). یکی از روش‌های شبیه‌سازی تغییرات در گذر زمان، مدل ترکیبی زنجیره مارکف و سلول‌های خودکار[۳] است. با استفاده از این مدل، نسبت تبدیل کاربری‌ها و امکان پیش‌بینی آن‌ها در آینده فراهم می‌شود (مولر و میدلتون[٤]، ۱۹۹٤). در سال‌های اخیر رهیافت‌های مفهومی مختلفی از سلول خودکار و تحلیل زنجیره مارکف برای پیش‌بینی تغییرات کاربری زمین ارائه شده است (سوبدی و همکاران[٥]، ۲۰۱۳). مونDال و همکاران[٦] (۲۰۲۰)، در تحقیقی تأثیر فیلترهای سازگار با مدل سلول خودکار مارکف را بر نتایج پیش‌بینی تغییر سرزمین بررسی نموده و نتیجه گرفته‌اند که ضریب همبستگی (r) برای فیلترهای 5x5 بیشترین تأثیر را در توزیع

1 Mirzaeizadeh et al
2 Pal and Mather
3 Cellular Automation- CA
4 Muller and Middleton
5 Subedi et al
6 Mondal et al

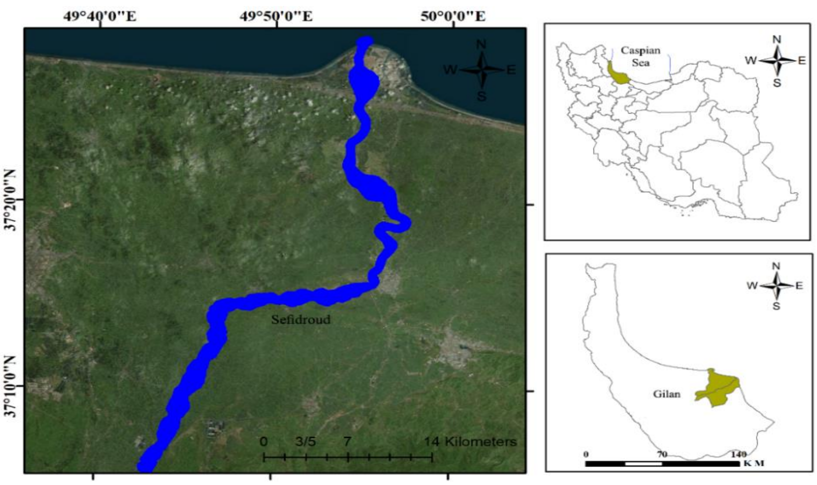
جغرافیایی/ مکانی داشته است. مدل و همکاران[1] (۲۰۲۰) به بررسی الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری در کانال رودخانه دشت‌های ساحلی پرداخته و نقش بهره‌گیری از کانال‌های آنابرانچ برای پایدارسازی کانال رودخانه پرداخته-اند. عبدالهی باغسیاهی و همکاران (۱۳۹۷) به پهنه‌بندی سیلاب آبراهه‌های منطقه مکران ساحلی با استفاده از مدل HEC-RAS و GIS پرداخته و نتیجه گرفته‌اند که هیچ‌گونه خطری از جهت پهنه‌های سیلابی متوجه تأسیسات ساحلی منطقه نخواهد بود. جینز و همکاران[2] (۲۰۱۷) عوامل مؤثر بر فرسایش کانال هشت رودخانه در انگلیس و ولز را با استفاده از روش‌های اصلاح شده GIS تجزیه‌وتحلیل نموده‌اند. کندلف و همکاران[3] (۲۰۱۶) در کتاب خود، طبقه‌بندی ژئومورفیکی را برای رودخانه‌ها و آبراهه‌ها ارائه داده‌اند. هلالات ناصریان و همکاران (۱۳۹۲)، مدل جامع سیلاب منطقه دشتیاری شهرستان چابهار را توسط مدل Mike Flood برای سیلاب با دوره بازگشت ۲۵ ساله تبیین نموده‌اند. معصومی و همکاران (۱۳۹۰)، به بررسی مورفولوژی و پیچانرودی رودخانه زهره پرداخته و نتیجه گرفته‌اند که این رودخانه در رده رودخانه‌های با پیچانرودی بیش از حد توسعه یافته قرار دارد. جداری عیوضی و همکاران (۱۳۸٤)، تکامل مورفولوژیک دلتای سفیدرود در کواترنر را با استفاده از شواهد زمین‌شناختی و تصاویر ماهواره‌ای مطالعه نموده است. براوارد و پتی[4] (۲۰۰۹)، به بررسی مورفولوژی رودخانه‌ها و کانال‌ها پرداخته و آن‌ها را طبقه‌بندی کرده‌اند. در میان عوامل مؤثر بر مورفولوژی رودخانه‌های مناطق ساحلی، تراز آب دریا در مصب و تغییرات آن یکی از عوامل مهم است (مدل و همکاران، ۲۰۲۰). ازآنجاکه تغییرات تراز آب‌های آزاد به‌کندی صورت می‌گیرد و در مقیاس زمانی انسان تا حدودی نامحسوس است، اغلب پژوهش‌های موجود بر اساس مدل‌های ریاضی انجام شده است. لیکن تغییرات تراز دریای خزر به‌عنوان بزرگ‌ترین دریاچه زمین، به‌واسطه شرایط خاص هیدرولوژیکی، زمین‌شناختی و اکولوژیکی دارای تأثیرات چشمگیر و قابل‌درک در مقیاس زمانی کوتاه‌مدت است. لذا این موضوع مورد توجه محققین بسیاری بوده است. خوشروان و همکاران[5] (۲۰۲۰) با استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی و مطالعات GIS به بررسی تأثیر نوسانات تراز دریای خزر بر تالاب بوجاق در دلتای سفیدرود پرداخته‌اند. چن و همکاران[6] (۲۰۱۷) به بررسی نقش تغییر در رژیم آبی رودخانه‌های منتهی به دریای خزر در تغییرات تراز آب پرداخته است. عطایی و همکاران (۱۳۹۵) تأثیر تغییرات تراز دریای خزر را بر انتقال رسوب ساحلی و خطوط ساحلی را موردبررسی قرار داده‌اند. عبدالهی کاکرودی (۱۳۹۲) تأثیر نوسانات دریای خزر بر مناطق ساحلی جنوب شرق آن، در محدوده خلیج گرگان و تالاب گمیشان را بررسی کرده است. اقتصادی و زاهدی (۱۳۹۰) عوامل مؤثر بر نوسانات تراز آب دریای خزر در سواحل جنوبی را با استفاده از داده‌های هواشناسی مورد تحلیل قرار داده‌اند. با

1 Medel et al
2 Janes et al
3 Kondolf et al
4 Bravard and Petit
5 Khoshravan et al
6 Chen et al

توجه به اهمیت موضوع نوسانات تراز دریای خزر و عملکرد متقابل فرایندهای مؤثر در آن، شناخت این فرایندها اولین گام در تحلیل اثرات توأم آن‌ها بر محیط پیرامون است. پرواضح است که هرگونه تغییر در فرایندهای محیطی می‌تواند عکس‌العمل طبیعت را در قالب عملکرد رودخانه بر منطقه ساحلی نشان دهد. این عکس‌العمل خود دارای تاثیرات گوناگونی بر زندگی، فعالیت‌ها و سرمایه‌های انسانی دارد. در مقابل اثرات انسان بر تغییر محیط نیز قابل توجه است. بر این اساس با توجه به اهمیت موضوع و منطقه از دیدگاه اقتصادی، زیست‌محیطی و... شناخت تغییرات رودخانه در طی زمان و فرآیندهای مؤثر از اصلی‌ترین عوامل در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی برای آینده است. این شناخت با استفاده از تکنیک‌های مدل‌های آماری قابلیت پیش‌بینی در بازه‌های زمانی آینده را نیز دارند. لذا سفیدرود به‌عنوان بزرگ‌ترین و مهم‌ترین رودخانه سواحل جنوب دریای خزر در این تحقیق مورد توجه قرار گرفت. در این تحقیق با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، میدانی و آماری، مدل تلفیقی زنجیره مارکف و سلول‌های اتومات، و نتایج تحقیقات گذشته تغییرات مورفولوژی سفید و عوامل محیطی مؤثر بر آن بررسی شده و روند تغییرات و عوامل تأثیرگذار، برای افق سال ۲۰۳۰ پیش‌بینی شده است.

۲- مواد و روش‌ها

محدوده این تحقیق در جلگه ساحلی سفیدرود در استان گیلان قرار دارد. این منطقه از غرب و شرق بازه تحت تأثیر از رودخانه سفیدرود و از جنوب و شمال از محدوده سد سنگر تا مصب رود را شامل می‌شود (شکل ۱). این منطقه بر دره زمین ساختی سفیدرود، محل تفکیک رشته‌کوه‌های البرز غربی و تالش جنوبی قرار دارد و قاعده آن با دو پیش‌آمدگی کاملاً مشخص در کیاشهر و دهنه سرکهنه سفیدرود منطبق برخط ساحلی کنونی است. مورفولوژی سفیدرود در محدوده دلتا به‌صورت بریده بریده و پیچانرود است (جداری عیوضی و همکاران، ۱۳۸٤).



شکل ۱- موقعیت مکانی منطقه مطالعه

در این پژوهش ابتدا مبانی نظری و اطلاعات‌پایه مورد نیاز، بر اساس مطالعات کتابخانه‌ای و بررسی گزارش‌ها و تحقیقات انجام شده مشابه در ایران و خارج از کشور گردآوری شده است. تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵، ۷ و ۸ مربوط به سال‌های ۱۹۸۷،۲۰۰۲ و ۲۰۱۸ با دقت مکانی ۳۰ متر و فصل تصویربرداری مشابه، مبنای مطالعات سنجش‌ازدور می‌باشند (جدول ۱). پردازش اولیه تصاویر در نرم‌افزار Envi 5.3 انجام شد. در این مرحله تصحیحات رادیومتری و اتمسفری به روش Quick بر تصاویر ماهواره‌ای اعمال گردید.

جدول ۱- مشخصات تصاویر ماهواره‌ای مورداستفاده در پژوهش

باندهای مورداستفاده	تاریخ تصویربرداری	مشخصات تصویر
1-2-3-4-5-7	1987.06.19	LANDSAT- LT05_166-034
1-2-3-4-5-7	2002.08.07	LANDSAT-LE07_166-034
MTL-Multispectral	2018.03.20	LANDSAT_LC08_156-042

پس از انجام تصحیحات، طبقه‌بندی تصاویر با روش طبقه‌بندی نظارت شده[1] در نرم‌افزار ArcGIS 10.4.1 صورت گرفت و نقشه کاربری اراضی و مورفولوژی کانال رودخانه تهیه شده است. در این نقشه واحدهای کانال رودخانه، سازه‌های ساخت انسان و سکونتگاه‌ها، اراضی ساحلی، اراضی جنگلی، دریا و دشت تفکیک شده‌اند. این نقشه‌ها در هر سه دوره تصاویر ماهواره‌ای تهیه شده است.

به‌منظور پیش‌بینی و مدل‌سازی، نقشه‌های سه دوره، به محیط نرم‌افزار Idrisi TerrSet وارد شد. ابتدا بر اساس نقشه‌های سال‌های ۱۹۸۷ و ۲۰۰۲ با استفاده از روش تلفیقی زنجیره‌های مارکوف و مدل سلول‌های خودکار به پیش‌بینی روند تغییرات کاربری اراضی در سال ۲۰۱۸ پرداخته شد. زنجیره مارکف مجموعه‌ای از وضعیت‌های احتمالی را بیان می‌کند که از یک وضعیت آغاز شده و به‌صورت پیوسته به وضعیت دیگر تغییر می‌کند (ژانگ و همکاران[2]، ۲۰۱۵). مدل تلفیقی زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار عاملی است که تغییر وضعیت هر سلول را بر اساس قانون تعیین وضعیت جدید، مطابق با وضعیت قبلی و وضعیت سلول‌های مجاور، نشان می‌دهد. در این مدل از فیلتر CA برای توسعه یک فاکتور وزندهی- مجاورت مکانی، برای تغییر وضعیت سلول بر اساس وضعیت همسایه‌اش استفاده می‌شود (سانگ و همکاران[3]، ۲۰۱۱)؛ بنابراین برای افزایش دقت پیش‌بینی مدل، ازاین‌روش تلفیقی استفاده شده است. لذا بر اساس داده‌های خروجی مدل مارکف، نقشه نهایی پیش‌بینی کاربری اراضی با استفاده از مدل CA مارکف سال ۲۰۱۸ استخراج گردید و ضریب کاپای مربوطه محاسبه شد. ضریب کاپا یک معیار صحت سنجی طبقه‌بندی بوده و بر اساس رابطه (۱) محاسبه می‌شود که در آن po درستی مشاهده شده و pc توافق مورد انتظار است.

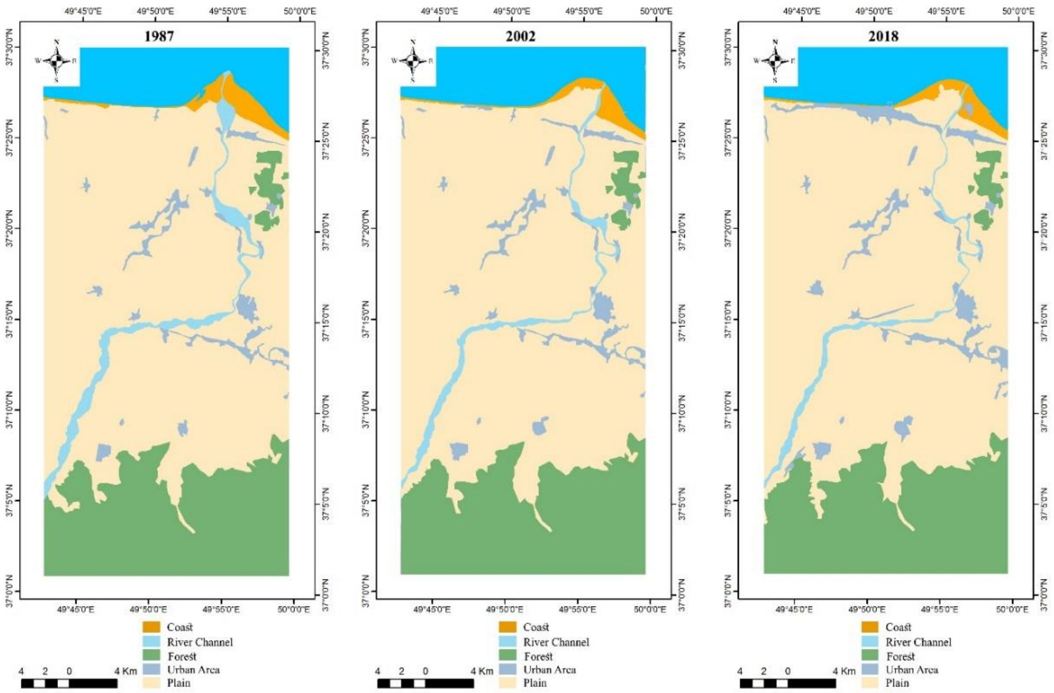
1 Maximum Likelihood Classification
2 Zhang et al
3 Sang et al

$$KIA = \frac{p_o - p_c}{1 - p_c} \quad (1)$$

خروجی مدل با نقشه حاصل از تصویر ماهواره‌ای سال ۲۰۱۸ برازش داده شد و بازه‌های مغایر بین آن‌ها بـه دسـت آمد. همچنین به‌منظور تعیین دقت طبقه‌بندی و مدل‌سازی، ۱۲۰ نقطه کنترل زمینی تصـادفی به‌صـورت پیش‌فـرض در نرم‌افزار ArcGIS 10.4.1 تعیین شد و با واقعیت مکـانی در منطقـه موردمطالعـه مـورد صـحت سـنجی قـرار گرفـت (جدول ۳). با توجه به دقت و صحت خروجی مدل، با استفاده از نقشه‌های سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۱۸، نقشـه پیش‌بینـی کاربری اراضی و مورفولوژی رودخانه برای سال ۲۰۳۰ تهیه شده است. این نقشه با برازش خروجی مـدل بـرای سـال ۲۰۳۰ و نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۱۸ به دست آمده است. در این برازش علاوه بر واحد کانال رودخانه، سـه واحـد تأسیسات ساخت انسان، دشت و اراضی ساحلی نیز در عملیـات بـرازش توسـط نرم‌افـزار ArcGIS 10.4.1 قـرار داده شدند. بر اساس نتایج به دست آمده از این برازش، مسیر جریان سفیدرود در منطقه موردمطالعه به چهار بخـش تقسـیم شد و در هر بخش تغییرات پیش‌بینی شده، موردبررسی قرار گرفت. بـه‌منظور تعیـین نقـش عوامـل محیطـی مـؤثر در تغییر مورفولوژی، از تغییرات عرض رودخانه، آمار دبی متوسط سالانه و تغییرات تـراز آب دریـای خـزر، بهـره گرفتـه شد. به‌منظور تعیین تغییرات عرض کانال، تعداد ۲۳ مقطع عرضی با فاصله متوسط ۱۵۰۰ متـر در مسـیر رودخانـه نظـر گرفتـه شـد. در هـر مقطـع عـرض کانـال در سـه دوره ۱۹۸۷، ۲۰۰۲ و ۲۰۱۸ بـا اسـتفاده از تصـاویر مـاهواره‌ای در نرم‌افزار ArcGIS 10.4.1 به دست آمد و بر اساس خروجـی مـدل در سـال ۲۰۳۰ نیـز عـرض کانـال در ایـن مقـاطع محاسبه شد. به‌منظور تعیین دبی متوسط سالانه سفیدرود، از آمار دبی ماهانه جریان ایستگاه هیـدرومتری آسـتانه اشـرفیه در سال‌های ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۸ استفاده شد (شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۹۸). همچنـین مقـادیر تغییـرات تـراز آب دریای خزر در بازه زمانی ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۸ بر اساس داده‌های ایستگاه سـاحلی پـایش تـراز آب انزلـی بـه دسـت آمـده (سازمان نقشه‌برداری کشور، ۱۳۹۸) و با استناد به پـژوهش‌هـای چـن و همکـاران (۲۰۱۷) و خوشـروان و همکـاران (۲۰۲۰) مورد تدقیق قرار گرفته است. درنهایت، تـأثیر ایـن عوامـل و نحـوه عملکـرد آن‌هـا در تغییـرات مورفولـوژی رودخانه در بازه زمانی ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۸ و روند آتی آن تا ۲۰۳۰ مورد تحلیل قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

با پردازش و طبقه‌بندی تصاویر در نرم‌افزارهای ArcGIS 10.4.1 نقشه کاربری اراضی و مورفولـوژی رودخانـه در سه دوره ۱۹۸۷، ۲۰۰۲ و ۲۰۱۸ تهیه شد (شکل ۲). در این نقشه‌ها واحـدهای کانـال رودخانـه (شـامل کانـال و بسـتر رود)، سازه‌های ساخت انسان (شامل سکونتگاه‌ها، سازه‌ها و ابنیه مختلـف)، جنگـل، دریـا، اراضـی سـاحلی و دشـت (پهنه‌های زراعی و غیر زراعی) تفکیک شده‌اند. مساحت واحدهای طبقه بندی شده در هر سـه دوره محاسـبه شـده و مورد مقایسه قرار گرفته است (جدول ۲).



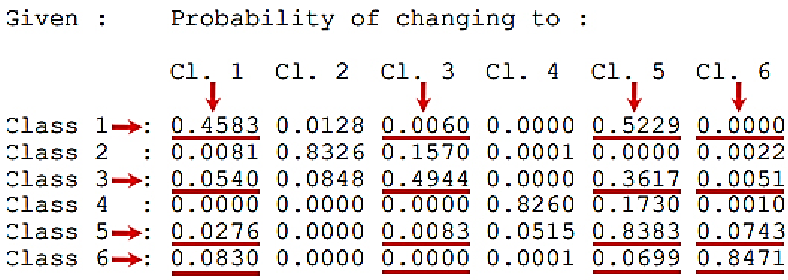
شکل ۲ - نقشه طبقه‌بندی و کاربری اراضی و مورفولوژی رودخانه در سه دوره ۱۹۸۷، ۲۰۰۲ و ۲۰۱۸

پیش‌بینی و مدل‌سازی، در محیط نرم‌افزار Idrisi TerrSet انجام شد. ابتدا با استفاده از نقشه‌های سال‌های ۱۹۸۷ و ۲۰۰۲ ماتریس مقادیر احتمال تغییرات کاربری اراضی در سال ۲۰۱۸ بر مبنای زنجیره‌های مارکوف به دست آمد (شکل ۳). در این ماتریس مقادیر احتمال تغییرات واحدهای رودخانه (Cl.1)، اراضی ساحلی (Cl.3)، تأسیسات ساخت انسان (Cl.6) و دشت (Cl.5) به یکدیگر مشخص شده است. براین اساس بیشترین احتمال وقوع تغییرات بین واحدهای رودخانه و دشت به میزان ۵۲/۲۹ درصد حاصل شده است (شکل ۳).

با توجه به امکان توصیف مکانی در قالب نقشه، از مدل CA مارکف استفاده شد و نقشه بیش بینی سلول اتومات سال ۲۰۱۸ و ضریب کاپای مربوطه استخراج گردید. بر این اساس تشابه مشهودی بین خروجی مدل و نقشه طبقه-بندی تصویر ماهواره‌ای سال ۲۰۱۸ مشاهده شد (شکل ٤). همچنین ضریب کاپای حاصل شده برای واحدهای رودخانه، اراضی ساحلی، تأسیسات ساخت انسان و دشت به ترتیب ۹۹/۳ ٪، ۸۵/۹٪، ۷۸/۵ و ۸۰/۷ ٪ به دست آمده است. ضریب کاپای کلی نیز ۸۵ درصد به دست آمده است (جدول ٤).

جدول ۲- مساحت واحدهای تفکیک شده در نقشه طبقه‌بندی کاربری اراضی و مورفولوژی رودخانه (هکتار)

تصویر ماهواره‌ای / واحد طبقه بندی	۲۰۱۸	۲۰۰۲	۱۹۸۷
کانال رودخانه	۲۰٦۸/٤۳	۲۵۱۹/۲۳	۳۷۸۵/۹۳
تأسیسات ساخت انسان	۵٦٦۰/۹۹	۳۸۸۸/۳۷	۳۳۹٦/۳۵
جنگل	۲۷۲۲۵/٤۲	۲۷۳۸۲/٤۸	۲۷۷۷۹/۷۱
اراضی ساحلی	۱۷۸۱/۵۸	۱٦۸۵/۵	۲۱۸۹/۷٦
دشت	۸۲٦۸۸/۰۳	۸۳۷۵٤/٦۳	۸۱۹۹۲/٦٤

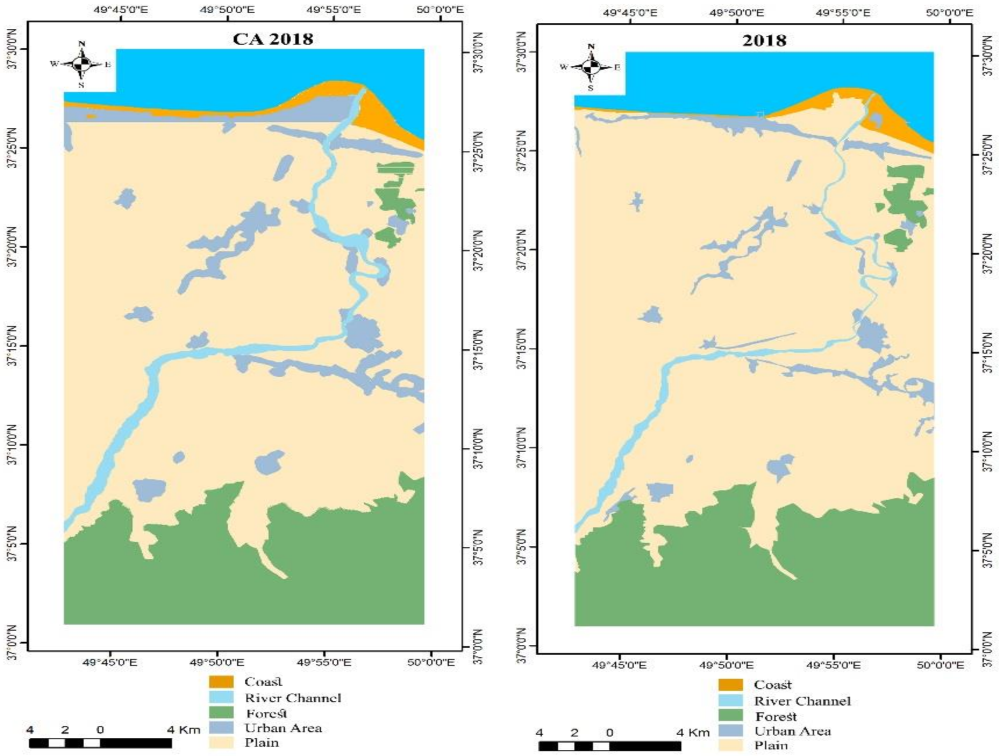


Given : Probability of changing to :

	Cl. 1	Cl. 2	Cl. 3	Cl. 4	Cl. 5	Cl. 6
Class 1	0.4583	0.0128	0.0060	0.0000	0.5229	0.0000
Class 2	0.0081	0.8326	0.1570	0.0001	0.0000	0.0022
Class 3	0.0540	0.0848	0.4944	0.0000	0.3617	0.0051
Class 4	0.0000	0.0000	0.0000	0.8260	0.1730	0.0010
Class 5	0.0276	0.0000	0.0083	0.0515	0.8383	0.0743
Class 6	0.0830	0.0000	0.0000	0.0001	0.0699	0.8471

شکل ۳ - ماتریس خروجی مدل مارکف برای تغییرات سال ۲۰۱۸

به‌منظور تعیین دقت طبقه‌بندی و مدل‌سازی، ۱۲۰ نقطه کنترل زمینی تصادفی، بـا واقعیـت مکـانی در منطقـه مـورد مطالعه مورد صحت سنجی قرار گرفت. بر اساس صحت سنجی میدانی، خروجـی مـدل در ۱۰۰ نقطـه صـحیح و در ۲۰ نقطه نادرست بوده است. نتیجه صحت سنجی نشان می‌دهد که در ۷٦٪ نقاط کنتـرل زمینـی، خروجـی حاصـل از مدل با واقعیت مطابقت داشته و مطابقت مطلوبی با ضریب کاپای مدل دارد. جزئیات عدم تطابق مشـاهدات میـدانی در جدول ۳ و ضرایب صحت سنجی مدل در جدول ٤ آمده است. بر اساس نتـایج مشـخص گردیـد اصلی‌تـرین عـدم تطابق بین دو واحد دشت و تأسیسات ساخت انسان به تعداد مجموع ۱۱ نقطه است.



شکل ٤ – نقشه طبقه‌بندی کاربری اراضی و مورفولوژی رودخانه سال ۲۰۱۸ (راست) در مقابل خروجی مدل CA مارکف (چپ)

جدول ۳- جزئیات عدم تطابق مشاهدات در نقاط کنترل زمینی با خروجی مدل

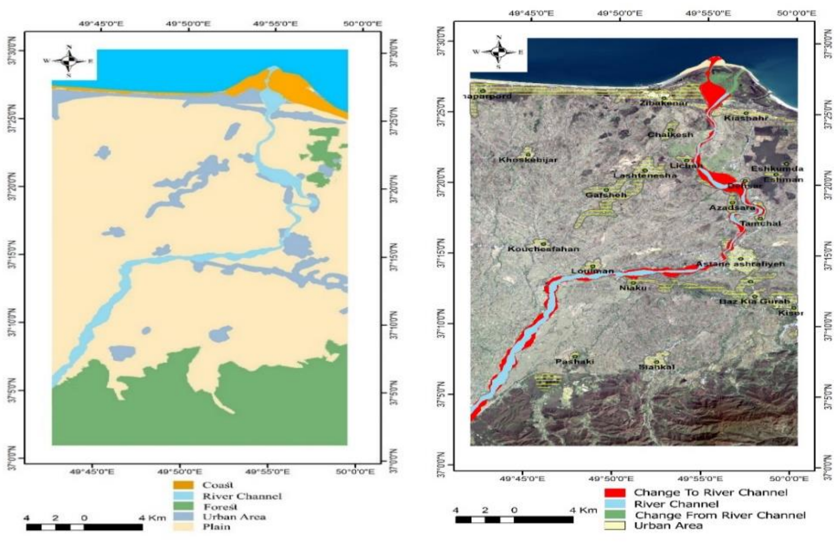
کاربری مشاهداتی	کاربری مدل‌سازی	تعداد نقاط
جنگل	دشت	۳
دشت	رودخانه	۵
دشت	تأسیسات ساخت انسان	٤
دریا	ساحل	۱
تأسیسات ساخت انسان	دشت	۷

جدول ٤- ضرایب صحت سنجی طبقه‌بندی در سه بازه زمانی مورد مطالعه

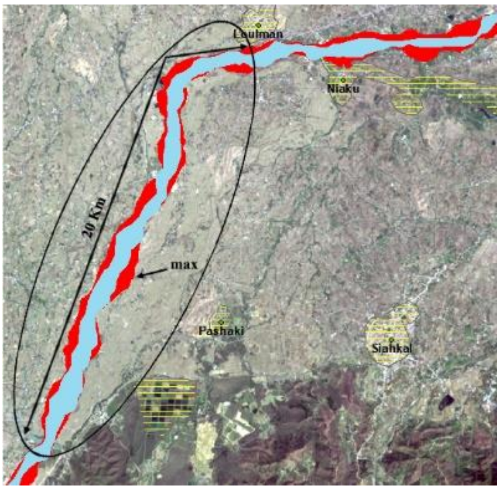
خطای حذف شده (٪)	دقت کاربر (٪)	خطای گماشته (٪)	دقت تولید کننده (٪)	ضریب کاپا در سه دوره (٪) ۲۰۱۸	۲۰۰۲	۱۹۸۷	واحد طبقه‌بندی
٤/۱۷	۹۵/۸۳	۱/۵	۹۸/۵	۹۹/۳	۹۵/۲	۹۸/۵	رودخانه
۰/۸۳	۹۹/۱۷	۸/۵	۹۱/۵	۸۳/۸	۸۱/۵	۸٦/۲	دریا
۱/٦٦	۹۸/۳۳	۱۱/۵	۸۸/۵	۸۵/۹	۷۹/۱	۸۹/٤	ساحل

خطای حذف شده (٪)	دقت کاربر (٪)	خطای گماشته (٪)	دقت تولید کننده (٪)	ضریب کاپا در سه دوره (٪) ۲۰۱۸	۲۰۰۲	۱۹۸۷	واحد طبقه‌بندی
۲/۵	۹۷/۵	۲	۹۸	۹۵/٦	۹۳/۹	۹۲/۲	جنگل
۸/۳۳	۹۱/٦٦	۱۵/۵	۸٤/۵	۸۰/۷	۷۸/۸	۸۰/۲	دشت
۳/۳۳	۹٦/٦٦	۲۳/۵	۷٦/۵	۷۸/۵	۷۵/٤	۷۹/۸	تأسیسات ساخت انسان
				۸۵/۹	۸۲/۹	۸٤/٤	ضریب صحت کلی

با توجه به دقت و صحت خروجی مدل CA مارکف، نقشه پیش‌بینی کاربری اراضی و مورفولوژی رودخانه برای سال ۲۰۳۰ با استفاده از نقشه‌های کاربری سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۱۸ تهیه شده است (شکل ۵). سپس چهار واحد رودخانه، اراضی ساحلی، سازه‌های ساخت انسان و دشت در دو نقشه سال ۲۰۱۸ و پیش‌بینی ۲۰۳۰ برازش داده شد و تغییرات محتمل در محیط رودخانه طی بازه زمانی ۱۲ ساله به دست آمد (شکل ۵). با استفاده از این نقشه، مناطق دارای پتانسیل تغییرات شدید در چهار بخش از مسیر رودخانه شناسایی شد (شکل‌های ٦ تا ۹). در این محدوده‌ها روند تغییرات به گونه‌ای خواهد بود که واحدهای پیرامون آن دستخوش فرآیندهای فرسایشی، تغییر پیچانرودی و سیل‌گیری خواهند بود. محدوده ۱ حدفاصل سد سنگر تا روستای لومان: در این محدوده به طول ۲۰ کیلومتر مسیر جریان در جهت شمال شرق می‌باشد. در این بخش اراضی حاشیه رودخانه در معرض جابجایی جانبی کانال و تشدید پیچانرودی قرار دارند. این اراضی عمدتاً شامل زمین‌های کشاورزی هستند. بیشینه عرض پهنه‌های در مخاطره حدود ٤۸۰ متر در ۸ کیلومتری جنوب سد قرار دارد (شکل ٦).

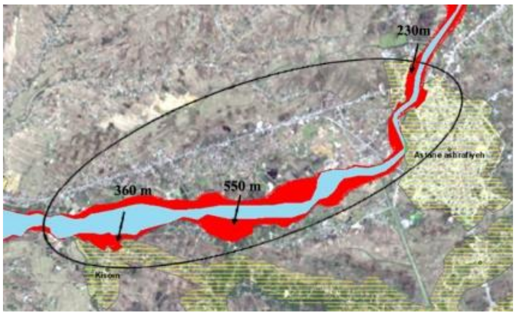


شکل ۵ - چپ: نقشه طبقه‌بندی کاربری اراضی و مورفولوژی رودخانه سال ۲۰۳۰ خروجی مدل CA مارکف.
راست: نقشه پیش‌بینی تغییرات محتمل در محیط رودخانه تا سال ۲۰۳۰



شکل ٦ - پیش‌بینی تغییرات مورفولوژی کانال رودخانه سفیدرود و محدوده تحت مخاطره شمال سد سنگر

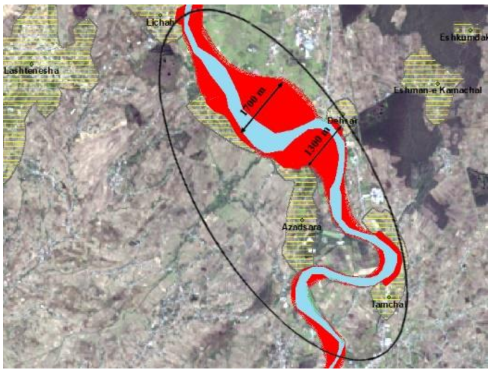
محدوده ۲ حدفاصل روستای کیسم و شهر آستانه اشرفیه: در این محدوده به طول حدود ۱۰ کیلومتر مسیر جریان در جهت شرق می‌باشد. اراضی حاشیه رودخانه این محدوده نیز در معرض جابجایی جانبی کانال و تشدید پیچانرودی قرار دارند. این اراضی عمدتاً شامل مناطق شهری و روستایی حاشیه رودخانه هستند. بیشینه عرض پهنه‌های در مخاطره در منطقه کیسم، حدود ۳٦۰ متر و در شهر آستانه اشرفیه حدود ۲۳۰ متر است. همچنین بیشینه عرض پهنه‌های در مخاطره این محدوده در ٤ کیلومتری غرب آستانه اشرفیه در حدود ۵۵۰ متر است (شکل ۷). در این منطقه باغات و مناطق روستایی در حاشیه رودخانه گسترده هستند.



شکل ۷ - پیش‌بینی تغییرات مورفولوژی کانال رودخانه سفیدرود و محدوده تحت مخاطره آستانه اشرفیه

محدوده ۳ حدفاصل آزادسرا تا دهسر: در این محدوده به طول حدود ۱۳ کیلومتر مسیر جریان در جهت شمال غرب می‌باشد. در این بخش اراضی حاشیه رودخانه در معرض تشدید پیچانرودی قرار دارند. این اراضی عمدتاً شامل مناطق مسکونی حاشیه رودخانه هستند. بیشینه عرض پهنه‌های در مخاطره در منطقه دهسر، حدود ۱۷۰۰ متر است. همچنین بیشینه عرض پهنه‌های در مخاطره این محدوده در بستر سیلابی حدفاصل دهسر و آزادسرا حدود

۱۳۰۰ متر بوده و به سمت شمال تا حدود ۳۵۰۰ متر امتداد دارد (شکل ۸). در این منطقـه منـاطق مسـکونی در حاشـیه رودخانه در معرض مخاطره تغییر پیچانرودها قرار دارند.



شکل ۸ - پیش‌بینی تغییرات مورفولوژی کانال رودخانه سفیدرود و محدوده تحت مخاطره آزادسرا- ده‌سر

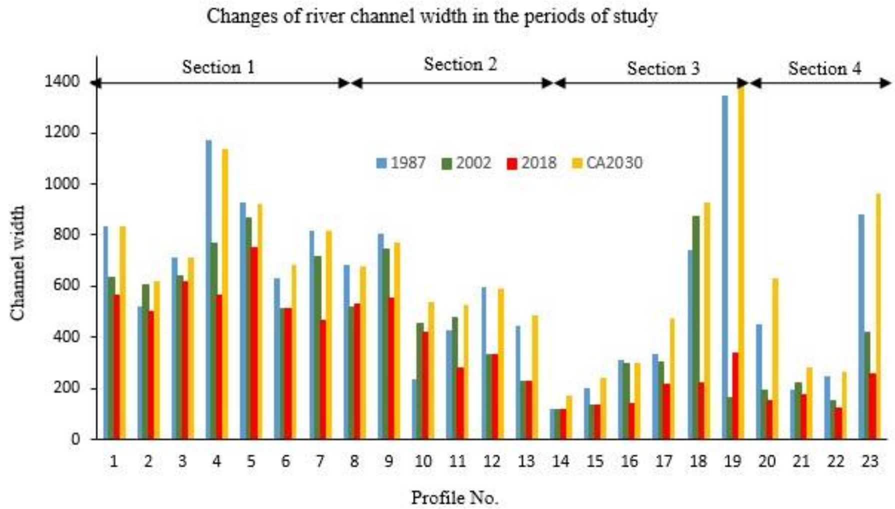
محدوده ٤ حدفاصل کیاشهر، تالاب بوجاق و ساحل دریای خزر: در این محدوده به طول حـدود ۷ کیلـومتر مسـیر جریان در جهت شمال می‌باشد. این بخش اراضی شمال کیاشهر، تالاب بوجاق و زیباکنار در دلتای سـفیدرود را شـامل می‌شود. در این محدوده پیش‌بینی مدل حاکی از تغییر مسیر جریان سفیدرود به سـمت غـرب مـی‌باشـد، بطـوری کـه کانال از مسیر فعلی منحرف شده و با هدایت به غرب در ابتدای تالاب بوجاق جریان خواهد یافـت. ایـن تغییـر مسـیر سبب جابجایی حدود ۲/۵ کیلومتر مصب خواهد شد. در اثر این فراینـد اراضـی شـمالی کیاشـهر و شـرق زیباکنـار در مخاطره بستر سیلابی سفیدرود بوده و بیشینه عرض این پهنه در تالاب بوجاق به ۲۱۰۰ متر می‌رسد (شکل ۹).



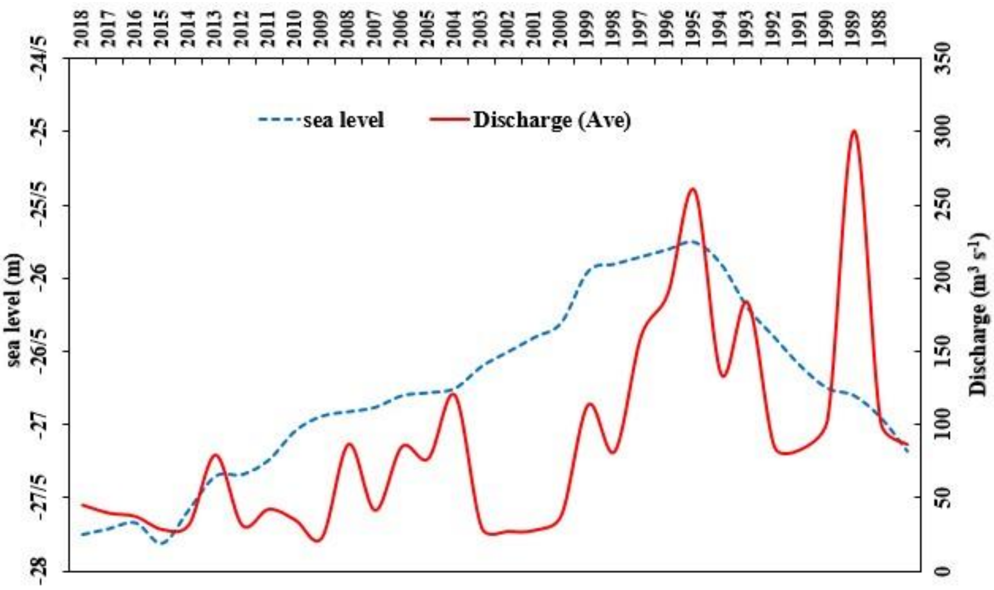
شکل ۹ - پیش‌بینی تغییرات مورفولوژی کانال رودخانه سفیدرود و محدوده تحت مخاطره کیاشهر- تالاب بوجاق

به‌منظور بررسی عوامل مؤثر و فرایندهای ناشی از تغییر مورفولوژی رودخانـه، در ۲۳ مقطـع عرضـی، رونـد تغییـر عرض کانال در سه دوره ۱۹۸۷، ۲۰۰۲ و ۲۰۱۸ در چهار محدوده مفروض (شـکل‌هـای ٦ تـا ۹) مـورد بررسـی قـرار گرفت. سپس عرض مقاطع مفروض در خروجی مدل برای سال ۲۰۳۰ نیـز محاسـبه شـد (شـکل ۱۰). ایـن بررسـی نشان داد متوسط عرض مقاطع در سال ۱۹۸۷ برابر ۵۹۳ متر بوده و در سـال ۲۰۰۲ بـه ٤۵۱ متـر و در سـال ۲۰۱۸ بـه ۳۵٦ متر رسیده است. این نتایج نشان می‌دهند در هر چهار محدوده عرض کانال روند کاهشـی داشـته اسـت. در ایـن میان عرض کانال رودخانه در مقطع عرضی ١٤ واقع در شهر آستانه اشـرفیه تقریبـاً ثابـت مانـده اسـت. ایـن در حـالی است که بر اساس خروجی مدل متوسط عرض کانال در سال ۲۰۳۰ به ٦۵۵ متـر و تقریبـاً ۱۰ درصـد بیشـتر از ۱۹۸۷ خواهد رسید.

تغییر در مورفولوژی کانال و الگوی فرسایش و رسوبگذاری رودخانه‌هـای سـاحلی بـه عوامـل متعـددی ازجملـه بارش، هیدرولوژی غالب و الگوی جزر و مدی در خروجی رودخانه وابسته است (مـدل و همکـاران، ۲۰۲۰. جینـز و همکاران، ۲۰۱۷). با توجه به کنترلی بودن رژیم جریان سفیدرود در منطقه مـورد مطالعـه، تغییـر در هیـدرولوژی تـابع میزان خروجی سد سفیدرود و سد سنگر می‌باشد. با توجه به تغییرات دبی متوسط سالانه (شـکل ۱۱)، رونـد کاهشـی در نمودار مشاهده می‌شود. این روند با الگوی آب و هوایی کاهش بارش در بازه زمانی ۱۹۹۵ تـا ۲۰۱۸ مطابقـت دارد. لذا به علت کاهش دبی، عکس‌العمل کاهش عرض کانال رخ داده است. از سوی دیگـر تغییـر تـراز آب دریـای خـزر عامل اصلی تغییر شیب هیدرولیکی رودخانه می‌باشد. در این میان باید توجـه داشـت کـه یکـی از عوامـل تغییـر تـراز دریای خزر نیز تغییر در میزان آبگیری از طریق رودخانه‌های ورودی بـه آن مـی‌باشـد (چـن و همکـاران، ۲۰۱۷). بـر اساس شکل ۱۱ روند تغییرات تراز دریای خزر تا سال ۱۹۹۵ افزایشی و پس از آن کاهشی بوده است. لـذا از ۱۹۹۵ تـا ۲۰۱۸ با توجه به پایین رفتن تراز دریای خزر، شیب هیدرولیکی سـفیدرود افـزایش یافتـه اسـت. ایـن افـزایش شـیب موجب تمایل جریان به حفر بستر و کاهش عرض کانال شده است. بر اسـاس قـانون مـدل وزن دهـی CA مـارکف، افزایش عرض کانال رودخانه نشان از تغییر در سلول‌های مجاور دارد. لذا با توجه بـه نتـایج حاصـل از بـرازش نقشـه سال ۲۰۱۸ و پیش‌بینی ۲۰۳۰ تغییر در مورفولوژی رودخانـه و مـدل پیچـانرودی آن حاصـل شـده اسـت. ایـن تغییـر موجب افزایش پهنه تأثیرپذیر از کانال رودخانه خواهد شد (شکل‌های ٦ تـا ۹). بطـوری کـه افـزایش متوسـط عـرض کانال رودخانه نیز این تغییرات را نشان می‌دهد (شکل ۱۰). در نتیجه چنین استنباط می‌شود که در بازه زمـانی ۲۰۱۸ تـا ۲۰۳۰، مطابق با الگوی به دست آمده از این تحقیق، تغییرات آب و هوایی و تراز دریای خـزر سـبب تغییـر در جهـت افزایش اراضی تحت تأثیر از کانال و مورفولوژی رودخانه خواهند شد. لذا با توجـه بـه نتـایج، افـزایش میـانگین دبـی سالانه رودخانه تا حدود ۱۰۰ مترمکعب بر ثانیه و افزایش تراز دریای خزر به سـطح بالـاتر از ۲۷– متـر تـا سـال ۲۰۳۰ پیش‌بینی می‌شود.



شکل ۱۰ - الگوی تغییرات عرض کانال سفیدرود در سه دوره مورد بررسی و پیش‌بینی مدل



شکل ۱۱ - الگوی تغییرات متوسط دبی سالانه در مقابل تغییر تراز آب دریای خزر

٤- نتیجه گیری

سفیدرود به‌عنوان بزرگ‌ترین و پرآب‌ترین رودخانه سواحل جنوبی دریای خزر محسوب می‌شود. تغییرات دائم در دلتا و مصب این رودخانه نشان از وقوع فرآیندهای کنترل کننده فعال در مورفولوژی این رودخانه است. با توجه به تغییرات دائمی در تراز آب دریای خزر، فرآیندهای آب و هوایی و فعالیت‌های انسانی، شناسایی تغییرات رودخانه

و پیش‌بینی آن بسیاری ضروری است. تحقیق حاضر در راستای این اهداف صورت گرفت و مباحث ذیل از آن نتیجه گیری شد.

- مدل تلفیقی CA مارکف، قابلیت مناسبی از نظر دقت و صحت در پیش‌بینی کاربری اراضی و مورفولوژی رودخانه سفیدرود دارد.
- بیشترین احتمال تغییرات در منطقه مطالعه در واحدهای رودخانه، اراضی ساحلی، تأسیسات ساخت انسان و دشت وجود دارد.
- روند این تغییرات به گونه‌ای خواهد بود که واحدهای پیرامون رودخانه دستخوش فرآیندهای فرسایشی، تغییر پیچانرودی و سیل‌گیری خواهند شد. این تغییرات حد فاصل سد سنگر تا روستای لومان به‌صورت جابجایی جانبی کانال و تشدید پیچانرودی، روستای کیسم و شهر آستانه اشرفیه و آزادسرا تا لیچاه به‌صورت سیل‌گیری تأسیسات انسانی و در محدوده کیاشهر، تالاب بوجاق و دلتای سفیدرود به‌صورت تغییر موقعیت مصب و جابجایی به غرب کانال رودخانه می‌باشد.
- با توجه به نتایج بررسی مقطع عرضی کانال رودخانه در سه دوره ۱۹۸۷، ۲۰۰۲ و ۲۰۱۸، روند کاهشی عرض کانال رخ داده است. این روند ناشی از کاهش دبی سفیدرود و پایین روندگی تراز آب دریای خزر، در نتیجه تغییر شیب هیدرولیکی رودخانه بوده است.
- بر اساس نتایج مدل تلفیقی CA مارکف تا سال ۲۰۳۰، روند افزایش عرض کانال رخ خواهد داد. بطوری که تغییرات مورفولوژیک ۱۲ ساله آینده رودخانه در جهت عکس تغییرات صورت گرفته در بازه زمانی ۳۱ ساله گذشته می‌باشد. این امر نشان دهنده افزایش میانگین دبی سالانه رودخانه تا حدود ۱۰۰ مترمکعب بر ثانیه و افزایش تراز دریای خزر به سطح بالاتر از ۲۷- متر تا سال ۲۰۳۰ است.

سپاسگزاری

این پژوهش برگرفته از نتایج طرح تحقیقاتی پیش‌بینی روند تغییرات مورفولوژی رودخانه‌های مناطق ساحلی شمال کشور با کد ۹۷۰۵۳۵-۰۲۳-۲۹-۲۹-۰ پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری است؛ ازاین‌رو از همکاران گروه مهندسی رودخانه و سواحل پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری در اجرای تحقیق قدردانی می‌گردد.

کتابنامه

اقتصادی، شهمیر؛ زاهدی، رفیعه؛۱۳۹۰. مطالعه عوامل تأثیرگذار بر نوسانات تراز آب خزر جنوبی. مجله علوم و فنون دریایی. شماره ۱۰(۳)، صص ٤-۱۳.

جداری عیوضی، جمشید؛ یمانی، مجتبی؛ خوش رفتـار، رضـا؛ ١٣٨٤. تکامـل ژئومرفولـوژی دلتـای رود سـپیدرود در کواترنر. پژوهش‌های جغرافیایی. دوره ٣٧ .شماره ٥٣. صص ٩٩-١٢٠.

سازمان نقشه برداری کشور؛ ١٣٩٨. آمار پایش تراز آب دریای خزر، ایستگاه انزلی.

شرکت مدیریت منابع آب ایران؛ ١٣٩٨. دفتر مطالعات پایه منابع آب. آمار دبی رودخانه سفیدرود، ایستگاه هیدرومتری آستانه.

عبدالهی باغسیاهی، علی؛ حشمتیان، رضا؛ سویزی، مهدی؛ ١٣٩٧. پهنه بندی سیلاب اصلی ساحل مکران با تلفیق مـدل HEC-RAS&GIS (رودخانه باهوکلات). یازدهمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه. اهواز. ایران.

عبدالهی کاکرودی، عطا؛ ١٣٩٢. نوسانات دریای خزر و تأثیر آن بر سواحل جنوب شرقی دریای خـزر. پـژوهش‌هـای ژئومورفولوژی کمی، شماره ٢(٣)، صص ٣٣-٤٤.

عطایی، سهیل؛ عجمی، مهدی؛ لشته نشایی، میراحمد؛ یعصوبی، سیدحسین؛ ١٣٩٥. تأثیر نوسـانات تـراز آب دریـا بـر تغییرات خطوط ساحلی دریای خزر. نشریه مهندسی دریا. شماره ١٢(٤)، صص ١٠٣-١١٣.

معصومی، حمیدرضا؛ غریب رضا، محمدرضا؛ معتمد، احمد؛ ١٣٩٠. بررسی مورفولوژی و الگوی پیچانرودی رودخانه زهره در جلگه ساحلی هندیجان. مجله مهندسی و مدیریت آبخیز. دوره ٣. شماره ٢. صص ١٠٢-١١٢.

هلالات ناصریان، حسین؛ صادقی، محمد عامل؛ واعظی پور، حسینعلی؛ سیف، سامان؛ ١٣٩٢. مدلسازی جـامع سـیلاب منطقه دشتیاری شهرستان چابهار توسط مـدل MIKE FLOOD و ارائـه طـرح علـاج بخشـی سـیل در منطقـه. دوازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران. تهران. ایران.

Bravard, JP. Petit, F., 2009. Geomorphology of streams and rivers. In Tochner K, Likens GE, editors. Encyclopedia of inland waters. Elsevier, 387-95. DOI: 10.1016/B978-012370626-3. 00043 -0.

Chen, J. L., Pekker, T., Wilson, C. R., Tapley, B. D., Kostianoy A. G., Cretaux, J. F., Safarov, E. S., 2017. Long-term Caspian Sea level change. Geophysical Research Letters, 6993-7001. DOL: 10.1002/2017GL073958.

Janes, V. J. J., Nicholas, A. P., Collins, A. L., Quine, T. A., 2017. Analysis of fundamental physical factors influencing channel bank erosion: results for contrasting catchments in England and Wales. Environmental Earth Science, 76-307. DOI: 10.1007/s12665-017-6593-x.

Khoshravan, H., Naqinezhad, A., Alinejad-Tabrizi, T., Yanina, T., 2020. Effects of the Caspian Sea water level change on Boujagh National Park, southwest the Caspian Sea. Caspian Journal of Environmental Science, 19(2), 99-110.

Kondolf, G. M., Piégay, H., David, R. M., Schmitt, L., David, R. M., 2016. Geomorphic classification of rivers and streams, Chapter 7. Tools in fluvial geomorphology. 169-202. DOI: 10.1002/9781118648551.ch7.

Medel, I. D., Stubblefield, A. P., Sheam C., 2020. Sedimentation and erosion patterns within anabranching channels in a lowland river restoration project. International Journal of River Basin Management, DOI: 10.1080/15715124.2020.1809435.

Mirzaeizadeh, V., Niknwzhad, M., Ouladi, J., 2015. Evaluating non-parametric supervised classification algorithms in land cover map using LandSat-8 Images. Journal of RS and GIS for natural resources, Vol. 6, No. 3, 29-44.

Mondal, S., Sharma, N., Kappas, M., Garg, P. K., 2020. Cellular automata (CA) contiguity filters impacts on CA Markov modelling of land use land cover change predictions results. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XLIII, B3, 1585–1591.

Muller, M. R., Middleton, J., 1994. A Markov model of land-use change dynamics in the Niagara Region, Ontario, and Canada. Landscape Ecology, 9, 151-157.

Pal, M., Mather, P. M., 2005. Support vector machines for classification in remote sensing. International Journal of Remote Sensing, 26 (5), 1007-1011.

Sang, L., Zhang, C., Yang, J., Zhu, D., Yun, W., 2011. Simulation of land use spatial pattern of towns and villages based on CA–Markov model. Mathematical and Computer Modelling, 10, 883-848. DOI: 2002022/j.mcm.10200220028.

Subedi, P., Subedi, K., Thapa, B., 2013. Application of a Hybrid Cellular Automation Markov (CA-Markov) Model in Land-Use Change Prediction: A Case Study of Saddle Creek Drainage Basin, Florida. Applied Ecology and Environmental Sciences, 16, 126-132.

Zhang, F., Tiyip, T., Feng, ZD. Kung, H-T., Johnson, V. C., Ding, JL., Tashpolat, N., Sawut, M. Gui, DW., 2015. Spatio-temporal patterns of land use/cover changes over the past 20 years in the middle reaches of the Tarim River, Xinjiang, China. Land Degradation and Development, 26,284- 29.